

REVESTIMIENTOS CON TIERRA Y FIBRAS VEGETALES: METODOLOGÍA DE ESTUDIO.

Diego García, Laura Milla, Antonia Navarro, Mariana Palumbo, Ana M Lacasta

Grup de Recerca GICITED. EPSEB. Universidad Politécnica de Catalunya (UPC).
Avda Gregorio Marañón, 44-50. Barcelona
Teléfono: + 34934016234
email: antonia.navarro@upc.edu

1. Patrimonio edificado y técnicas de construcción con tierra. Tradición, innovación y nuevos métodos de conservación.

revestimientos con tierra y fibras vegetales, métodos de conservación, construcción con tierra.

RESUMEN

De todos es conocido que las construcciones realizadas con tierra deben protegerse de las inclemencias meteorológicas y ascensiones capilares. Por tanto, es conveniente utilizar barreras de ascensión capilar en las partes bajas de las construcciones, y cubiertas con aleros que evacuen el agua de lluvia fácilmente. Pero también es importante revestir la construcción para impedir la entrada de agua en forma líquida, sin olvidarse de permitir su transpirabilidad.

Los revestimientos más comunes utilizados son de cal, yeso, e incluso de tierra con fibras, dependiendo de la tradición de cada zona. Pero este conocimiento es empírico, y no hay una normativa específica que pautе las propiedades que debe de cumplir un revestimiento aplicado sobre una construcción de tierra determinada.

Por ello, en este trabajo se presenta unos diseños experimentales de revestimientos de tierra con fibras vegetales de diferente composición, tamaño de partícula, y proporción respecto a la tierra. También se indica la metodología analítica utilizada para determinar el comportamiento del revestimiento frente a la humedad ambiental, presencia de agua líquida, conductividad térmica, abrasión, y adherencia al soporte.

Los resultados muestran el comportamiento de cada diseño experimental. También indican la validez de la metodología ya que se basa en ensayos reproducibles y se obtienen datos comparables.

PONENCIA

1.- Antecedentes

En los últimos años se ha intensificado el trabajo de investigación en torno a la arquitectura de tierra. Esto es debido principalmente a una creciente necesidad de encontrar una tecnología constructiva más respetuosa con el medio ambiente, pero también a una revalorización del legado arquitectónico que lleva a interesarse por su restauración y conservación.

Tal vez, uno de los aspectos menos estudiados es el que se refiere a los revestimientos de tierra. La mayor parte del conocimiento que ha llegado hasta nuestros días se basa en un saber empírico que se ha transmitido de generación en generación en forma de recetas más o menos precisas. Existe un amplio número de recetas que han sido recopiladas en diversas publicaciones divulgativas, dirigidas principalmente a aplicadores y/o auto-construtores (Moréteau)¹. También algunas empresas han adaptado o creado sus propias recetas y

comercializan preparados de tierra, estabilizada o no, para su uso como revestimiento. (Ecoclay², Embarro³, Argilus⁴, Akterre⁵, Ecolodeve⁶, The Clay Plaster Company⁷, etc.).

Muchas de estas recetas incorporan fibras vegetales tales como pajas o virutas de madera para evitar las fisuras de retracción en el secado. El papel de las fibras en los revestimientos de tierra es similar al que juegan en los composites de resinas orgánicas, que han experimentado un importante desarrollo en los últimos años. (Ashour et al.⁸; Sobral, HS.⁹; Müsig, J.¹⁰).

Sin embargo, no existe todavía una metodología estandarizada que permita la caracterización, comparación i optimización de las formulaciones de revestimientos de tierra, ya que los trabajos científicos realizados en este campo son escasos.

En este sentido, el laboratorio de Craterre en la Universidad de Grenoble, en Francia, tiene un proyecto en marcha con el objetivo de recopilar y analizar en el laboratorio algunas de las formulaciones. Los resultados de este trabajo no están disponibles todavía. Ashour et al. han publicado recientemente varios artículos (Ashour et al.^{11,12,13}) en los que caracterizan y comparan diez formulaciones de revestimientos de tierra y fibras vegetales (paja de trigo, paja de cebada y virutas de madera). Sus resultados muestran que en condiciones iguales, el contenido de humedad es mayor en las formulaciones que incorporan paja de trigo que en el resto. También concluyen que las fibras tienen un efecto positivo en la resistencia a tracción y la ductilidad del material.

El presente trabajo pretende indagar sobre la posibilidad de adoptar metodologías de ensayo aplicadas en el estudio de otros materiales como morteros de albañilería, y endurecidos de revoco y enlucidos para el análisis de revestimientos de tierra y fibras vegetales.

Por último, y aprovechando la construcción de un módulo de tapia y madera, presentado en este congreso como “Módulo casa S-Low”, se ha estudiado el comportamiento de los revestimientos aplicados en esta construcción.

2.- Tipos de materiales estudiados

Los revestimientos ensayados son de tierra y fibras vegetales.

La tierra es la misma que la utilizada para realizar la tapia de la construcción “Casa S-Low”, aunque previamente ha sido cortada por debajo de 2 mm. El origen de la tierra es un suelo no orgánico de Castellbisbal (Barcelona), de color rojizo. Según los ensayos de mecánica de suelos, se trata de un suelo arcilloso inorgánico de mediana plasticidad.

Además, se han realizado diversas dosificaciones con fibras vegetales de dos orígenes (paja de cebada y cáscara de arroz), trituradas y tamizadas para obtener fibras de diferentes diámetros (2mm, 1mm, 0,5mm y 0,25mm). Las dosificaciones de fibra se han valorado en función del volumen del aglutinante, es decir la tierra.

La cantidad de agua utilizada en las mezclas ha sido determinada esencialmente para obtener una óptima trabajabilidad de la masa, considerando una aplicación como revestimiento manual.

Tras un exhaustivo estudio, se han conseguido unas dosificaciones óptimas para 100 gr de tierra (tabla 1):

Tamaño fibra (mm)	Cebada															
	2				1				0,5				0,25			
Volumen fibra/ volumen tierra (%)	100%	70%	50%	30%	100%	70%	50%	30%	100%	70%	50%	30%	50%	30%	20%	10%
Masa fibra (gr)	4,35	3,05	2,18	1,31	5,47	3,83	2,74	1,64	6,26	4,38	3,13	1,88	3,42	2,05	1,37	0,68
Masa agua (gr)	29,8	26,5	23,5	21,5	33,3	27,8	24,8	22,2	37,0	30,8	26,3	22,5	28,0	23,8	20,0	21,5
Tamaño fibra (mm)	Arroz															
	1															
Volumen fibra/ volumen tierra (%)	50%	30%	20%	10%												
Masa fibra (gr)	4,42	2,65	1,77	0,88												
Masa agua (gr)	21,7	20,5	20,0	19,6												

Tabla 1.- Dosificaciones óptimas estudiadas. En todos los casos la cantidad de tierra es de 100 gr.

3.- Diseño experimental

Se han realizado ensayos tanto en laboratorio como una vez colocados los revestimientos sobre la construcción prototipo “casa S-Low”.

Los primeros ensayos han servido para estudiar su comportamiento frente a la humedad (retracción, isotermas de equilibrio con humedad ambiente, permeabilidad al vapor de agua) y determinar algunas características físicas (conductividad y difusividad térmicas) y mecánicas (abrasión y flexo-tracción).

Los ensayos in situ han servido para cuantificar su comportamiento frente a la absorción de agua líquida, así como la adherencia con el sustrato.

No existe normativa específica para revestimientos de tierra, por eso se ha tenido que buscar normativas apropiadas para cada ensayo. Las más adecuadas han sido las específicas para morteros de albañilería, endurecidos de revoco y enlucidos y baldosas de terrazo.

Además, y con la finalidad de determinar el comportamiento de los revestimientos frente a la humedad ambiente, se ha desarrollado un protocolo normalizado de trabajo (PNT).

Las medidas de las probetas confeccionadas han estado condicionadas a los ensayos realizados, y se especifican en cada ensayo:

Para determinar la **retracción lineal** que experimentan los distintos revestimientos, una vez pastados y mantenidos en condiciones estables de laboratorio (20°C y 50% Hr), se han confeccionado probetas prismáticas de 25 x 25 x 287 mm y se ha seguido la norma UNE 83831 EX Métodos de ensayo de los morteros para albañilería endurecidos. Determinación de la estabilidad dimensional de los morteros para albañilería endurecidos.

Se han determinado las **isotermas de equilibrio con la humedad ambiente** de los revestimientos, a una temperatura ambiente constante. Este ensayo no es normativo, y se ha diseñado un protocolo de trabajo normalizado:

Se han utilizado probetas cilíndricas de 15 mm de grosor y 65 mm de diámetro. Partiendo de probetas secas, se han estabilizado en unas condiciones ambientales de 20°C y 30% Hr, controlado la variación de peso. Posteriormente se ha cambiado la humedad al 70%, 80% y 90% y se ha vuelto a controlar la variación de peso hasta estabilizarse con la humedad.

Se ha determinado el **factor de resistencia al vapor de agua (μ)** según norma UNE-EN 1015-19:1999 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido. El tamaño de las probetas es de 4x4x1 cm.

Los datos obtenidos en los anteriores ensayos han permitido una primera selección de las dosificaciones más idóneas para un revestimiento expuesto al exterior. Así pues, de las mejores dosificaciones se realizaron los siguientes ensayos:

Conductividad y difusividad térmicas determinadas mediante un equipo analizador Quickline-30. Este equipo utiliza un método de determinación dinámico, basado en la norma ASTM D5930.

Resistencia a la abrasión superficial según norma UNE-EN 13748-2:2005 Baldosas de terrazo. Parte 2: Baldosas de terrazo para uso exterior.

Estos ensayos se realizaron sobre las mismas probetas, de 100 x 100 x 30 mm.

Por último, y para tener valores de referencia con revestimientos de conglomerante aéreo o hidráulicos, se ha determinado la **resistencia a flexo-tracción** con probetas normalizadas de 40 x 40 x 160 mm, según la norma EN 1015-11:1999 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.

Posteriormente, y utilizando como superficie el módulo casa S-Low, se realizó unas pruebas “in situ” (Figura 1) de cada una de las dosificaciones. Estas catas se colocaron en la cara oeste del módulo, y se protegieron de la radiación solar y de la lluvia incidente mediante un panel aislante.

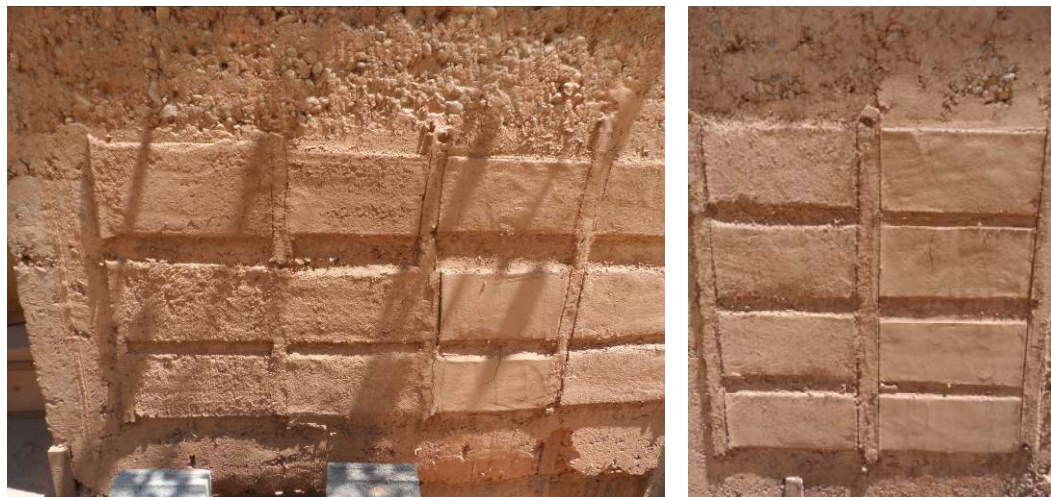


Figura 1.- Imágenes de los revestimientos aplicados en el módulo casa S-Low. Fuente propia.

Se realizaron dos ensayos in situ, para determinar el comportamiento de cada tipo de revestimiento en el exterior. Se determinó la **adherencia con el paramento de tapia**, según la norma UNE-EN 1015-12 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes, y la **permeabilidad al agua líquida**, según recomendación II.4, Absorción de agua a baja presión, de la Comisión 25-PEM RILEM.

4.- Resultados

4.1.- Retracción

A continuación se muestran los resultados obtenidos según el porcentaje de fibra, para un mismo tamaño (Figura 2), y según el tamaño de la fibra, para un mismo porcentaje (Figura 3). En todos los casos se muestran los promedios correspondientes a tres probetas de cada dosificación.

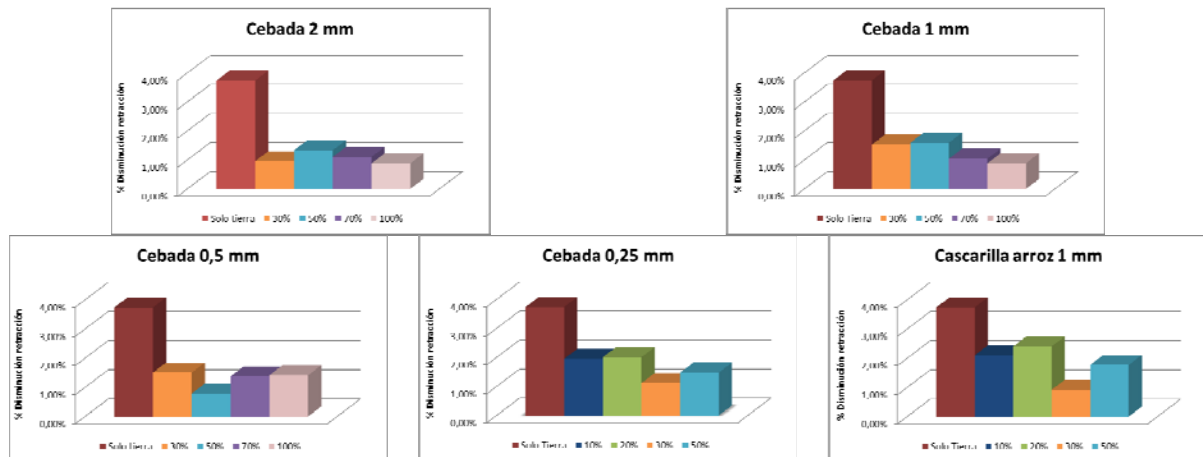


Figura 2.- Dependencia de la retracción con el porcentaje de fibras. Los distintos gráficos corresponden a diferentes tipos de fibra y distintos tamaños de éstas.

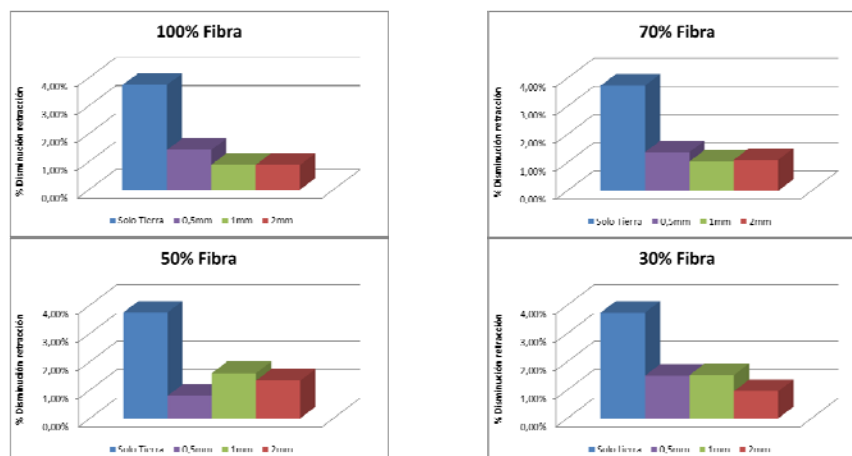


Figura 3.- Dependencia de la retracción con el tamaño de fibra. Los distintos gráficos corresponden a diferentes porcentajes de fibra de cebada.

Como primera observación vemos que el revestimiento de sólo tierra retrae más que cuando se le incorpora la fibra. La tendencia general que se observa es que, para un mismo tipo y tamaño de fibra, una mayor proporción respecto a la tierra conlleva una menor retracción.

Por otro lado, para un mismo porcentaje de fibras, la tendencia general es una disminución de la retracción al aumentar el tamaño de la fibra.

Comparando fibras de dos tipos, cáscara de arroz y cebada, de un mismo tamaño (1mm), se observa un resultado sorprendente: la proporción del 50% de arroz presenta más retracción que en el caso de la cebada, mientras que para la proporción del 30%, el orden se invierte. Este hecho debería analizarse con mayor profundidad, aumentando el número de probetas ensayadas.

4.2.- Absorción de vapor de agua

Se han ensayado todas las dosificaciones mostradas en la tabla 1. Se ha observado que la tierra se equilibra con la humedad ambiente antes (3 días) que incorporando fibras (4-5 días). De forma excepcional, las muestras con fibras de 0.25 mm con porcentajes de 10 y 20 % tardan lo mismo que la tierra, posiblemente debido a que el bajo porcentaje y el pequeño tamaño de fibras las haga similares a la tierra sin aditivar.

Las siguientes gráficas muestran el porcentaje de vapor absorbido en función de las diferentes humedades ambientales, para cada tamaño de la fibra y correspondientes a cuatro porcentajes de fibra respecto a la tierra (Figura 4). En todos los casos se muestran los promedios correspondientes a tres probetas de cada dosificación.

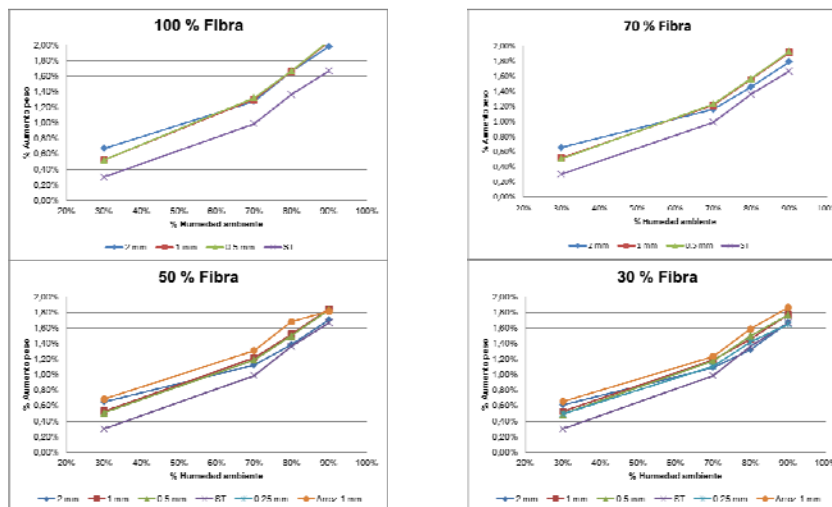


Figura 4.- Curvas de absorción de vapor de agua frente a la humedad ambiental para distintos tamaños de fibra de cebada. Los distintos gráficos corresponden a diferentes porcentajes de fibra. En los dos últimos se ha incluido la curva correspondiente a la cáscara de arroz.

La tierra absorbe menos que cuando se le incorporan fibras vegetales. La absorción tiende a igualarse a humedades ambientales elevadas (a partir del 80%) sobre todo cuando la fibra es de 2 mm y en proporciones iguales o inferiores al 50%.

Las muestras con cáscara de arroz absorben más humedad que las correspondientes a la cebada, para un mismo tamaño de partículas.

4.3.- Coeficiente resistencia al vapor de agua (μ)

En la tabla 2 se presenta los resultados obtenidos para el coeficiente de resistencia al vapor de agua μ como valor medio de tres probetas cada uno.

	% Fibra		100	70	50	30
	Tamaño					
Cebada	2 mm		6,09	5,70	7,22	8,84
	1 mm		6,93	6,68	8,33	8,71
	0,5 mm		6,35	9,35	7,59	9,00
	0,25 mm				9,42	
Arroz	1 mm				9,01	8,35

Tabla 2.- Valores de resistencia al vapor de agua μ

Se observa, como tendencia general, que a mayor volumen de fibras más permeable al vapor de agua (menor resistencia) presenta el revestimiento. Respecto al tamaño de las

mismas, cuanto más grandes son, más permeable es el revestimiento. En cuanto al tipo de fibra, no se observan diferencias apreciables en los casos ensayados con cebada y cáscara de arroz.

En estos momentos, se está llevando a cabo el ensayo de la permeabilidad de la tierra sin fibras.

4.4.- Conductividad térmica

La tabla 3 muestra los datos de densidad aparente, así como la conductividad y difusividad térmicas.

Muestra			Densidad aparente ρ (gr/cm3)	Conductividad térmica λ (W/m·K)	Difusividad térmica α (m²/s)
Cebada	2 mm	70%	1,50	0,57	0,40 E-6
		100%	1,25	0,42	0,48 E-6
	1 mm	70%	1,50	0,72	0,99 E-6
		100%	1,37	0,45	1,05 E-6
	0,5 mm	70%	1,46	0,73	0,48 E-6
		100%	1,36	0,53	0,76 E-6
	0,25 mm	30%	1,74	0,79	0,56 E-6
		50%	1,67	0,59	0,40 E-6
Arroz	1 mm	30%	1,84	0,86	0,57 E-6
		50%	1,73	0,83	0,55 E-6
Sólo Tierra		0%	1,78	0,81	0,54 E-6

Tabla 3.- Densidad y propiedades térmicas obtenidas para las distintas formulaciones analizadas

Se puede apreciar que en casi todos los casos, las muestras sin fibras presentan una mayor densidad aparente y conductividad térmica. Al depender la difusividad térmica de forma directamente proporcional a la conductividad térmica e inversamente proporcional a la densidad, los valores de dicha difusividad no siempre son mayores.

La tendencia general es que, para una misma proporción de fibra, el mayor tamaño comporta un aislamiento mayor (menor conductividad térmica). Así mismo, para un mismo tamaño, una mayor proporción de fibra conlleva también un aislamiento mayor.

En el caso de la cáscara de arroz, se obtienen resultados similares a la tierra sin aditivar, sin que afecte la proporción.

4.5.- Abrasión

Este ensayo, como ya se ha mencionado en la sección 3, es de aplicación para terrazos y no se exige para morteros de revestimiento. Se trata de un ensayo en el que se pone en compromiso la cohesión del material a ensayar, dada la presión que ha de soportar por una cara y la abrasión por la otra.

En este caso, las muestras sólo de tierra no han sido capaces de soportar este ensayo (ver Figura 5-derecha). En los revestimientos con fibras de tamaños superiores a 0,25 mm, por norma general, no se han producido variaciones significativas ni en función del tamaño ni de la cantidad de fibra, obteniéndose valores de huella alrededor de 50±5 mm (Figura 5-izquierda). Los revestimientos con fibras de 0.25 mm presentan valores superiores a los anteriores, y aumentan a medida que disminuye el porcentaje de fibras.



Figura 5.- Muestras ensayadas correspondientes a revestimiento con fibras (izquierda) y sin fibras (derecha).

4.6.- Flexo-tracción:

La deformación que experimentan las muestras con fibra ensayadas a flexo-tracción es mayor que la de las probetas sin fibras. Esta deformación aumenta tanto al aumentar el tamaño de partícula como la proporción de fibra.

Respecto a la resistencia a flexo-tracción, no se observa una tendencia clara en cuanto al efecto del tamaño y porcentaje de fibra, obteniéndose valores similares en todos los casos. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 4.

		Tensión N/mm ²	Deformación %			Tensión N/mm ²	Deformación %
Sólo Tierra	0%	0,23	0,76%	0,5 mm	30%	0,19	0,82%
2 mm	30%	0,18	0,97%		50%	0,17	0,96%
	50%	0,17	1,39%		70%	0,16	1,15%
	70%	0,13	1,33%		100%	0,11	1,63%
	100%	0,23	1,66%				
1 mm	30%	0,13	0,80%	Arroz 1 mm	50%	0,13	1,16%
	50%	0,18	1,19%		10%	0,23	0,85%
	70%	0,15	1,17%		20%	0,19	1,00%
	100%	0,18	1,41%		30%	0,19	1,06%
					50%	0,14	0,66%

Tabla 4.- Tensión y máxima deformación en ensayos de flexo-tracción

4.7.- Adherencia

La forma en que han roto las muestras ensayadas (figura 6) indica que se ha producido una rotura por cohesión del revestimiento, sin llegar en ningún caso a producirse una falta de adherencia del mismo con el soporte.

Los valores de rotura obtenidos varían entre un máximo de 0.33 N/mm² y un mínimo de 0.07 N/mm², sin que se aprecie una influencia ni del tamaño de fibra ni de su proporción.



Figura 6.- Ensayo de adherencia in situ

4.8.- Permeabilidad al agua líquida

Comparando los resultados obtenidos (tabla 5), se observa que el tamaño de la fibra añadida en los revestimientos es el factor que más afecta a la impermeabilidad al agua líquida, de tal manera que a mayor tamaño, mayor impermeabilidad. El porcentaje también es influyente, aunque en menor medida (figura 7).



Figura 7.- Ensayo de permeabilidad al agua líquida

Dosificación	Absorción a 30 minutos (ml)		
	100%	70%	50%
2 mm	2,88	2,60	2,40
1 mm	3,65	2,95	2,75
0,5 mm	4,23	3,35	3,38

Tabla 5.- Cantidad de agua absorbida a los 30 minutos de los revestimientos.

5.- Conclusiones

Se han analizado distintas propiedades de revestimientos formulados con tierra y fibras vegetales. Se han considerado un total de 20 formulaciones con dos tipos de fibras distintas (paja de cebada y cáscara de arroz), y se ha variado la proporción tierra-fibra y el tamaño de partícula de la fibra.

En relación a la retracción, los ensayos de laboratorio han mostrado que ésta disminuye tanto al aumentar el tamaño de fibra como el porcentaje de la misma.

En general, el contenido de humedad de las muestras para una misma humedad relativa ambiente es mayor para las probetas con fibras, y mayor para el arroz que para la cebada. Éstos resultados son compatibles con los obtenidos por Ashour¹³; los valores obtenidos para el revestimiento de sólo tierra son muy similares, mientras que los que incorporan paja de cebada suelen ser, en su caso, algo superiores, posiblemente debido a que utilizaron un mayor tamaño de fibra.

El ensayo de resistencia al vapor de agua ha mostrado una mayor permeabilidad para las probetas que incorporan una mayor proporción de fibras y un mayor tamaño de éstas.

Tal como era de esperar, la densidad de las probetas y su conductividad térmica disminuyen al aumentar tanto el porcentaje de fibra como su tamaño. Estos resultados concuerdan cualitativamente con los obtenidos por otros autores¹¹.

Los resultados del ensayo de abrasión no han sido concluyentes y sería necesario aumentar el alcance del estudio. Únicamente en los casos de menor tamaño de fibra (0,25 mm) se ha

observado que el aumento en el porcentaje de fibras produce un aumento en la resistencia a la abrasión del revoco, resultado que concuerda con los de otros autores¹².

Los ensayos de flexo-tracción no son concluyentes en lo que respecta a la resistencia, pero sí al grado de deformación, que aumenta al incrementar la proporción de fibras y su tamaño.

En cuanto al ensayo de adherencia, se ha podido constatar que la cohesión del revestimiento es siempre menor que la adherencia del mismo al sustrato de tapia, sin haberse podido obtener una relación entre la cantidad de fibra o su tamaño con una mayor o menor cohesión. Se ha de tener en cuenta que la heterogeneidad del revestimiento favorece la dispersión de resultados.

La permeabilidad al agua líquida de los revestimientos ensayados aumenta a medida que disminuye el tamaño de la fibra incorporada y, en menor medida, al aumentar la proporción respecto a la tierra.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte de la Generalitat de Catalunya a través del proyecto 2009SGR 878.

Bibliografía

¹ Moréteau, S. Enduits de terre crue. Terre vivante, 2012.

² Ecoclay: <http://www.ecoclay.es>

³ Embarro: <http://www.embarro.com>

⁴ Argilus: http://www.materiaux-naturels.fr/images/produit/notice/n_620.pdf

⁵ Akterre: http://www.akterre.com/akterre_documentation/construction/AK_monocouche.pdf

⁶ Ecolodeve: http://www.ecolodeve.fr/Enduit_terre.html

⁷ The clay plaster company: <http://www.theclayplastercompany.co.uk/>

⁸ Ashour, T. et al.: Compressive strength of fibre reinforced earth plasters for straw bale buildings. Australian Journal of Agricultural Engineering, (2010).

⁹ Sobral, HS (ed.): Vegetable Plants and Their Fibres as Building Materials. Chapman and Hall, London (1990).

¹⁰ Müsig, J. (ed.): Industrial applications of natural fibres: Structure, properties and technical applications. John Wiley & Sons, (2010).

¹¹ Ashour, T. et al.: The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings. Materials and design, (2010).

¹² Ashour, T. et al.: The influence of natural reinforcement fibres on erosion properties of earth plaster materials for straw bale buildings. Journal of Building Appraisal, (2010).

¹³ Ashour, T. et al.: An experimental investigation on equilibrium moisture content of earth plaster with natural reinforcement fibres for straw bale buildings. Applied thermal engineering, (2011).